

На правах рукописи

Кляйнрок Иван Юрьевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН
В СОСТАВЕ ПАРОГАЗОВЫХ ЭНЕРГООБЛОКОВ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в ЗАО «Уральский турбинный завод» и на кафедре «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бродов Юрий Миронович

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Голошумова Вера Николаевна

Официальные оппоненты: Куличихин Владимир Васильевич
доктор технических наук, профессор
кафедры «Промышленные теплоэнергетические системы» ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский университет – Московский энергетический институт», г. Москва

Сосновский Андрей Юрьевич кандидат технических наук, главный специалист
Департамента строительства электростанций ОАО «Корпорация Развития», г. Екатеринбург

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»), г. Москва

Защита состоится 26 октября 2012 г. В 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5, ауд. Т-703.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан 17 сентября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Аронсон К.Э.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В соответствии со стратегией развития энергетики в Российской Федерации приоритетным инновационным направлением в строительстве новых энергетических объектов являются парогазовые установки (ПГУ) утилизационного типа – наиболее эффективная и экономичная технология получения тепловой и электрической энергии на сегодняшний день. В связи с этим все отечественные и зарубежные турбостроительные заводы ведут интенсивную разработку проектов и производство оборудования для ПГУ.

В частности, только на ЗАО «Уральский турбинный завод» (УТЗ) разработано более 50 эскизно-технических проектов теплофикационных паровых турбин, предназначенных для работы в составе парогазовых энергоблоков. В основу конструкции данных паровых турбин, а также в технологию их эксплуатации заложены как стандартные решения, отработанные на теплофикационных паровых турбинах для теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), так и новые решения, обусловленные спецификой работы паровых турбин в составе парогазового энергоблока. Поэтому унификация узлов теплофикационных паровых турбин для ПГУ, а также разработка оптимальной технологии их эксплуатации являются важными и актуальными задачами.

Продолжительность пуска мощных ПГУ в зависимости от теплового состояния оборудования может занимать более трех часов и определяется главным образом длительностью пуска паровой турбины. Поэтому одной из основных задач при комплексной оптимизации пусковых режимов ПГУ является разработка оптимальной технологии пуска паровой турбины с учетом сложных технологических связей между газотурбинной установкой (ГТУ), котлом-утилизатором (КУ) и паротурбинной установкой (ПТУ). Решение данной задачи осложняется еще и тем, что ПГУ в нашей стране стали реализовываться сравнительно недавно, количество действующих установок невелико, поэтому пусковые режимы работы паровых турбин, работающих в их составе, недостаточно изучены и технология их пуска неоптимальная.

Целью работы является проведение исследований, необходимых для оптимизации пусковых режимов работы теплофикационных паровых турбин УТЗ для ПГУ. Объектом исследований является теплофикационная паровая турбина Т-53/67-8,0, уже работающая в составе ПГУ-230 Минской ТЭЦ-3. В качестве пусковых режимов работы данной паровой турбины автором рассматриваются графики пуска турбины из холодного и неостывшего состояний, разработанные УТЗ и ОАО «ВТИ» (ВТИ).

Одной из основных причин, ограничивающих маневренные характеристики паровой турбины при пусковых режимах работы, являются температур-

ные напряжения, возникающие в высокотемпературных элементах ее конструкции. С учетом этого, в рамках данной диссертационной работы поставлены и решены следующие задачи:

- анализ возможных мест возникновения и методов вычисления недопустимых температурных напряжений в элементах конструкции теплофикационной паровой турбины для ПГУ;
- определение граничных условий теплообмена в проточной части теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0;
- моделирование температурного и термонапряженного состояния ротора высокого давления (РВД) теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0;
- моделирование температурного и термонапряженного состояния корпуса цилиндра высокого давления (ЦВД) теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0;
- определение «критических» элементов конструкции теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0, ограничивающих ее маневренные характеристики по условию термпрочности;
- разработка средств непрерывного контроля и автоматического ограничения недопустимого термонапряженного состояния «критических» элементов конструкции теплофикационной паровой турбины для ПГУ;
- разработка технологии автоматизированного пуска теплофикационной паровой турбины для ПГУ с учетом текущего термонапряженного состояния «критических» элементов ее конструкции.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны модели нестационарной теплопроводности при переменных во времени и пространстве граничных условиях теплообмена и напряженно-деформированного состояния (НДС) высокотемпературных узлов теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 с учетом их реальной геометрической конфигурации и изменения механических и теплофизических свойств стали в зависимости от температуры;
- выполнено комплексное исследование температурного и термонапряженного состояния высокотемпературных узлов теплофикационной паровой турбины для ПГУ;
- определено, что «критическим» элементом конструкции теплофикационной паровой турбины для ПГУ, ограничивающим ее маневренные характеристики и, как следствие, характеристики парогазового энергоблока в целом, является корпус ЦВД;
- установлена нелинейная стохастическая связь (регрессионная модель) между температурными напряжениями в «критических» зонах корпуса ЦВД и

температурами металла в его точках, позволяющая контролировать термонапряженное состояние корпуса ЦВД при пусковых режимах работы теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0;

- разработаны алгоритмы непрерывного контроля и автоматического ограничения недопустимого термонапряженного состояния «критических» элементов конструкции паровой турбины с учетом их дальнейшей реализации на основе микропроцессорной техники;

- представлена концепция автоматизированной технологии пуска теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 по текущему термонапряженному состоянию «критических» элементов ее конструкции.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в разработке комплекса решений по повышению надежности теплофикационных паровых турбин для ПГУ при пусковых режимах работы. Энергоблок ПГУ-230 Минской ТЭЦ-3 является первым энергоблоком с теплофикационной паровой турбиной УТЗ. Поэтому результаты настоящей работы фактически являются базой для разработки и проектирования подобных энергетических объектов и основой для создания проектов паровых турбин УТЗ для ПГУ. С учетом того, что в проектах паровых турбин для ПГУ используется ряд унифицированных решений, полученные результаты могут быть применены при проектировании и модернизации серийных теплофикационных паровых турбин УТЗ для ТЭЦ.

Разработана технология пуска теплофикационной паровой турбины для ПГУ, позволяющая перейти от временных графиков пуска паровой турбины к автоматизированному пуску турбины по текущему термонапряженному состоянию «критических» элементов ее конструкции, что, в свою очередь, обеспечит оптимальный режим эксплуатации оборудования по условию термочечности.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается:

- применением современных инструментов построения геометрических моделей при помощи лицензионного, сертифицированного программного комплекса Creo Parametric;

- применением современных численных расчетных методов, реализованных в сертифицированном, лицензионном программном комплексе ANSYS;

- использованием современных апробированных методов планирования эксперимента и статистических методов обработки экспериментальных результатов при помощи сертифицированного, лицензионного программного комплекса MathCAD, а также лицензионного программного продукта Microsoft Excel.

Результаты диссертационной работы получены на основе общепризнанных отработанных методик с использованием руководящих технических материалов и проектно-конструкторской документации УТЗ и хорошо согласуются

с аналогичными расчетными и экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Личный вклад автора заключается в научно-техническом обосновании поставленных целей и задач исследования, разработке моделей прогрева и НДС элементов конструкции теплофикационных паровых турбин для ПГУ, проведении расчетных исследований, анализе и обобщении их результатов, разработке средств контроля и ограничения недопустимых температурных напряжений в элементах конструкции теплофикационных паровых турбин и корректировке существующей технологии пуска теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0.

На защиту выносятся следующие положения:

- двухмерная осесимметричная конечно-элементная модель прогрева и НДС РВД теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0, учитывающая охлаждение пара в переднем концевом уплотнении (ПКУ) и реальную геометрическую конфигурацию в зоне лабиринтовых уплотнений (без использования эмпирических коэффициентов концентрации напряжений);
- трехмерная конечно-элементная модель прогрева и НДС верхней половины корпуса ЦВД теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 с учетом билинейного упругопластического поведения материала;
- результаты расчетного исследования температурного и термонапряженного состояния РВД теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0;
- результаты расчетного исследования температурного и термонапряженного состояния корпуса ЦВД теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0;
- результаты исследований по определению «критических» элементов конструкции теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0, ограничивающих ее маневренные характеристики по условию термпрочности;
- результаты регрессионного анализа, устанавливающего стохастическую связь между температурными напряжениями в «критических» зонах корпуса ЦВД и температурами металла в его точках;
- алгоритмы непрерывного вычисления температурных напряжений в «критических» зонах корпуса ЦВД;
- алгоритмы автоматического ограничения недопустимых температурных напряжений в «критических» зонах корпуса ЦВД;
- автоматизированная технология пуска теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 по текущему термонапряженному состоянию «критических» элементов ее конструкции.

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались на следующих семинарах, симпозиумах и конференциях: XVI Уральская международная конференция молодых ученых по приори-

тетным направлениям развития науки и технологии (Екатеринбург, 2009); научно-технические семинары кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (Екатеринбург, 2010-2012); научно-технические семинары ЗАО «Уральский турбинный завод» (Екатеринбург, 2010-2012); VI Международный симпозиум по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Миасс, 2011); VI Международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, 2011); II Международная научно-практическая конференция «Современная наука: теория и практика» (Ставрополь, 2011); II Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Современная российская наука глазами молодых исследователей» (Красноярск, 2012); Всероссийская молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2012); VIII Международная научная конференция «Проблемы энергосбережения Украины и пути их решения» (Харьков, 2012); X Международная научно-практическая интернет-конференция «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (Орел, 2012); Всероссийская молодежная конференция «Пути совершенствования работы теплотехнических устройств» (Владивосток, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 по списку Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка (162 наименования). Общий объем диссертации 155 страниц, включая 52 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена общая характеристика диссертационной работы, показана ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена научная новизна и практическая ценность выполненного исследования.

В **первой** главе представлен аналитический обзор научно-технической литературы по вопросам исследования пусковых режимов работы паровых турбин.

Серьезным изучением данного вопроса в свое время занимались многие советские научно-исследовательские институты. Среди них можно выделить работы сотрудников Центрального котлотурбинного института (К.П. Селезнева, И.В. Ильинского, А.И. Таранина, В.Г. Тырышкина, В.С. Шаргородского, Л.А. Хоменка), Всесоюзного теплотехнического института (А.Ш. Лейзеровича, Е.Р. Плоткина, Н.С. Чернецкого, Г.Д. Авруцкого, А.Д. Меламеда, В.А. Панфи-

лова, В.Ф. Гуторова, Ю.А. Радина). Известны совместные работы сотрудников Института проблем машиностроения Украины и Харьковского политехнического института (Д.А. Переверзева, Л.А. Шубенко-Шубина, В.А. Костыркина, А.Г. Лебедева), а также работы сотрудников Харьковского филиала Центрального конструкторского бюро (В.И. Берлянда, А.В. Пожидаева).

Результаты исследований пусковых режимов работы паровых турбин также отражены в публикациях сотрудников советских турбостроительных заводов: Харьковского турбогенераторного завода (В.А. Палея, В.Н. Галацана, Ю.Ф. Косяка), Ленинградского металлического завода (М.С. Фрагина, Б.Ю. Гутмана) и Уральского турбомоторного завода (Л.С. Иоффе, Г.Д. Баринберга).

Среди сотрудников учебных заведений следует выделить исследования Б.М. Трояновского, В.А. Щегляева, А.Д. Трухня, А.Г. Костюка, В.В. Куличихина, В.Я. Роточа, Э.К. Аракеляна (Московский энергетический институт) и В.Л. Похорилера (Уральский политехнический институт).

В данном направлении также велись работы такими организациями, как: Центральный научно-исследовательский институт комплексной автоматизации, Киевский институт автоматики, Всесоюзный государственный трест по организации и рационализации районных электростанций и сетей «ОРГРЭС», Всесоюзный проектный и научно-исследовательский институт «Теплоэлектропроект», «Ростовэнергоремонт» и Калужский турбинный завод.

На основе работ представленных авторов отмечено, что решение задачи оптимизации пусковых режимов работы паровой турбины в общем случае предполагает проведение исследования температурного и термонапряженного состояния высокотемпературных элементов ее конструкции. Данное исследование главным образом необходимо для определения «критических» элементов конструкции паровой турбины, ограничивающих ее маневренные характеристики по условию термopочности.

Показано, что температурные напряжения, возникающие в стопорном клапане блока клапанов контура ВД, не являются определяющим фактором, ограничивающим маневренные характеристики теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0.

Принято, что наиболее достоверным способом нахождения «критических» элементов конструкции данной паровой турбины может быть моделирование температурного и термонапряженного состояния РВД и корпуса ЦВД при пусковых режимах работы паровой турбины методом конечных элементов

в программном комплексе ANSYS. В процессе пуска турбины целесообразно поддерживать температурные напряжения в «критических» элементах ее конструкции на предельно допустимом уровне, при этом остальные величины критериев надежности не должны выходить за допустимые значения. Таким образом, темп нагружения паровой турбины будет оптимальным.

Отмечено, что по результатам анализа температурного и термонапряженного состояния элементов конструкции паровой турбины необходимо выбрать объем и позиции эксплуатационного температурного контроля. Логическим завершением комплексной задачи исследования пусковых режимов работы паровой турбины является разработка технологических основ автоматизации ее пусков.

Подробно рассмотрен объект исследования, в том числе определены и проанализированы графики пуска теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 из типовых тепловых состояний. Установлено, что продолжительность пуска турбины из холодного состояния по графику УТЗ составляет около трех часов, а в его основу заложены типовые скорости прогрева элементов конструкции паровых турбин для ТЭЦ. По результатам проведения пробных пусков ПГУ-230 с теплофикационной паровой турбиной Т-53/67-8,0 на Минской ТЭЦ-3 графики пуска энергоблока скорректированы ВТИ. В результате продолжительность пуска турбины из холодного состояния, согласно графику ВТИ, уменьшилась примерно в два раза, при этом скорости прогрева элементов ее конструкции и разности температур в контролируемых сечениях не превышают допустимых значений, установленных УТЗ.

На основании выполненного анализа обоснованы и сформулированы задачи исследования.

Во **второй** главе представлена двухмерная осесимметричная конечно-элементная модель прогрева и НДС РВД теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0, разработанная автором в программном комплексе ANSYS. На основе сформулированной модели выполнено расчетное исследование температурного и термонапряженного состояния РВД.

В результате автором получены расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений по четвертой теории прочности (энергетический критерий Мизеса) в РВД для режимов пусков турбины из холодного и неостывшего состояния по графикам УТЗ и ВТИ для зон возникновения максимальных температурных напряжений (рис. 1-3).

Согласно рис. 1 наибольшие температурные напряжения в процессе пуска турбины возникают по графику УТЗ к четвертой минуте разворота (выход тур-

бины на 500 об/мин) в зоне передней придисковой галтели диска второй ступени и составляют $\sigma_4 = \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 146$ МПа. В дальнейшем, и на протяжении оставшегося времени пуска турбины по графику УТЗ, наибольшие температурные напряжения возникают в зоне передней придисковой галтели диска первой ступени и к двадцатой минуте разворота турбины составляют $\sigma_2 = 60$ МПа.

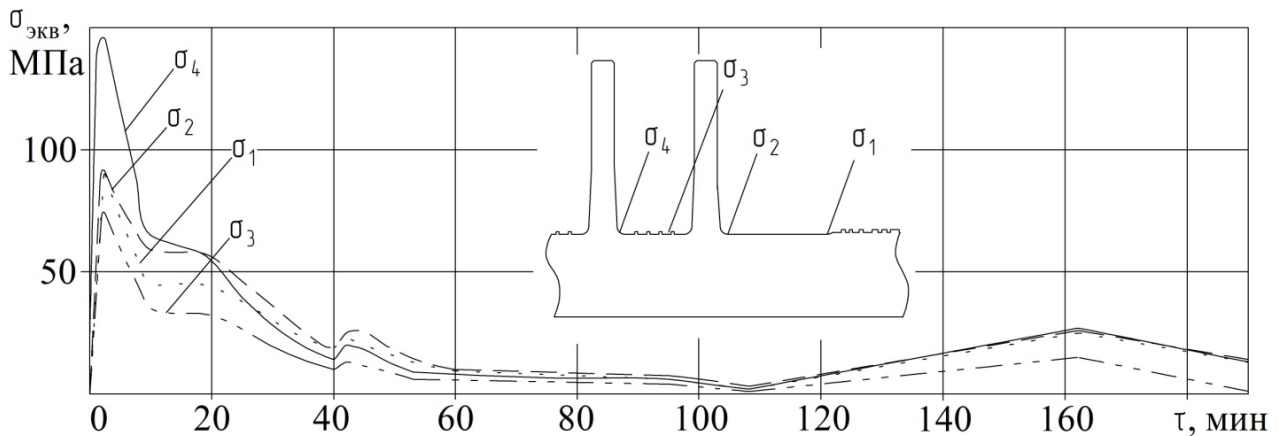


Рис. 1. Расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений в РВД при пуске турбины из холодного состояния по графику УТЗ: σ_1 – галтель на входе пара в ПКУ; σ_2 – передняя придисковая галтель диска первой ступени; σ_3 – первая по ходу пара тепловая канавка диафрагменного уплотнения первой ступени; σ_4 – передняя придисковая галтель диска второй ступени

Из рис. 2 видно, что характер возникновения температурных напряжений при режиме пуска по графику ВТИ незначительно отличается от пуска по графику УТЗ: в обоих случаях «критическими» зонами являются придисковые галтели. Наибольшие температурные напряжения в процессе пуска турбины возникают к четвертой минуте разворота (выход турбины на 500 об/мин) в зоне передней придисковой галтели диска второй ступени и составляют $\sigma_4 = \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 113$ МПа.

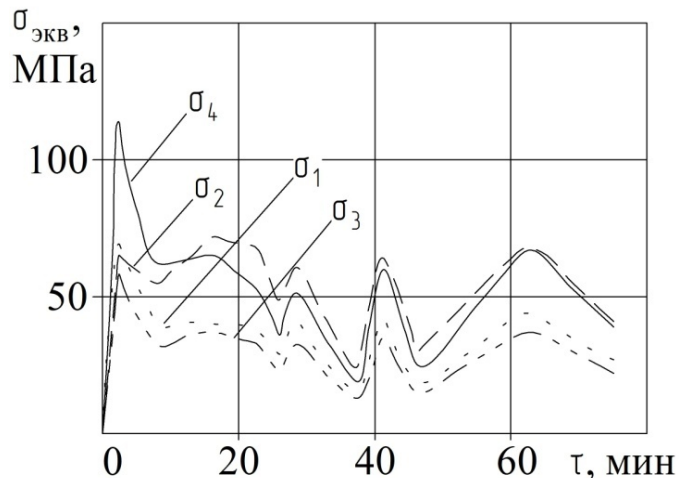


Рис. 2. Расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений в РВД при пуске турбины из холодного состояния по графику ВТИ

Аналогичные зависимости получены и для режима пуска турбины из неостывшего состояния. Однако в этом случае максимальные температурные напряжения в зоне передней придисковой галтели диска второй ступени возникают не при развороте, а при наборе электрической нагрузки и достигают $\sigma_4 = \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 61$ МПа (рис. 3, пятьдесят четвертая минута пуска).

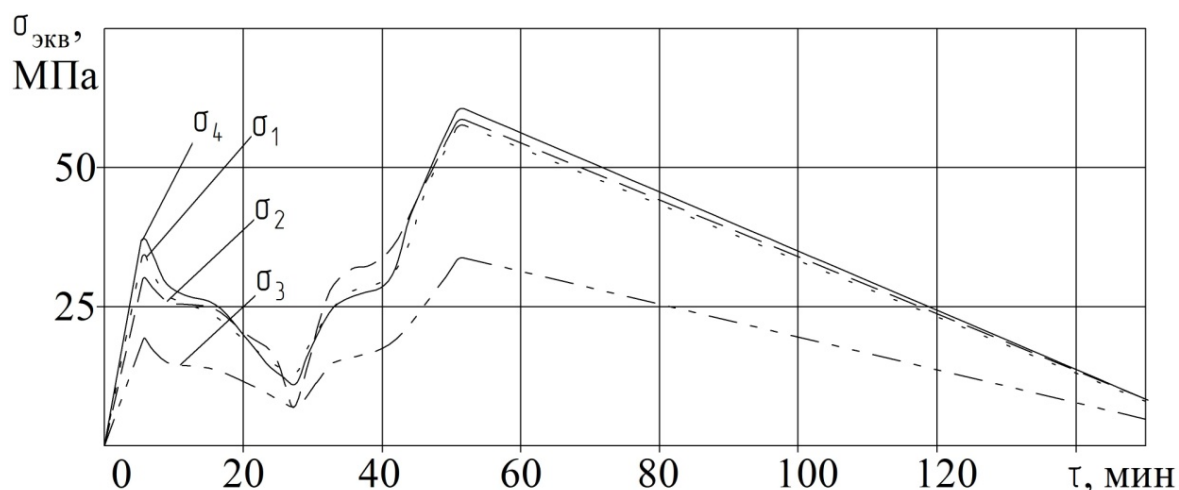


Рис. 3. Расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений в РВД при пуске турбины из неостывшего состояния по графику ВТИ

Анализ результатов, полученных автором, показал, что термонапряженное состояние РВД не является фактором, ограничивающим маневренные характеристики теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 при пусковых режимах работы, так как в нем не возникает температурных напряжений, превышающих предел текучести стали 25Х1М1ФА $\sigma_{0,2}^{400\text{ }^{\circ}\text{C}} = 420$ МПа, поэтому необходимости организации непрерывного контроля за температурным и термонапряженным состоянием ротора нет, а для надежной работы паровой турбины необходимо и достаточно контролировать его (ротора) относительное расширение.

В **третьей** главе представлена трехмерная конечно-элементная модель прогрева и НДС корпуса ЦВД теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0, разработанная и реализованная автором в программном комплексе ANSYS. На основе сформулированной модели выполнено расчетное исследование температурного и термонапряженного состояния корпуса ЦВД. Получены расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений в корпусе ЦВД для рассматриваемых режимов пусков турбины для зон возникновения максимальных температурных напряжений (рис. 4-6).

Согласно рис. 4 для режима пуска турбины по графику УТЗ наиболее «термонапряженной» областью корпуса ЦВД является зона приварки Г-образного полукольца к корпусу турбины. К восемнадцатой минуте разворота турбины в данной зоне возникают максимальные температурные напряжения $\sigma_3 = \sigma_{\text{экв}}^{\text{max}} = 457$ МПа. По мнению автора, возникновение столь высоких температурных напряжений в данной зоне можно объяснить тем, что стенки полукольца омываются паром как изнутри, так и снаружи и достаточно быстро прогреваются в отличие от стенки и фланцев корпуса, к которым полукольцо при-

варено. В результате в сварном шве возникают значительные температурные напряжения, обусловленные стеснением теплового расширения полукольца. В дальнейшем (к шестьдесят пятой минуте пуска) при прогреве стенки и фланцев корпуса температурные напряжения в этой зоне снижаются, а местом возникновения максимальных температурных напряжений становится область паровпуска в зоне радиусного перехода.

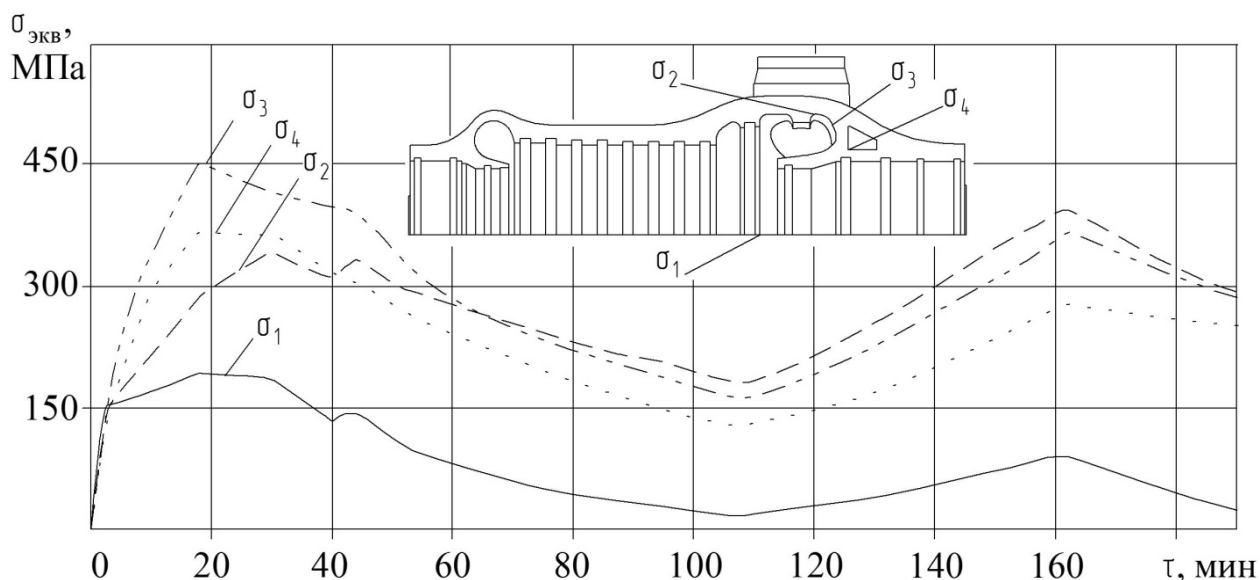


Рис. 4. Расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений в корпусе ЦВД при пуске турбины из холодного состояния по графику УТЗ: σ_1 – зона уплотняющего пояска горизонтального разреза корпуса; σ_2 – область паровпуска в зоне радиусного перехода стенки корпуса; σ_3 – зона приварки Г-образного полукольца к корпусу; σ_4 – изгиб полукольца в камере отсоса пара после первого отсека ПКУ

Для режима пуска турбины по графику ВТИ местом возникновения максимальных температурных напряжений также является зона приварки Г-образного полукольца. Максимальные температурные напряжения в данной зоне составляют $\sigma_3 = \sigma_{\text{экв}}^{\text{max}} = 521$ МПа, однако возникают не на начальном этапе пуска, а практически при выходе турбины на номинальную нагрузку (рис. 5, семьдесят пятая минута пуска), что объясняется более высоким темпом нагружения паровой турбины.

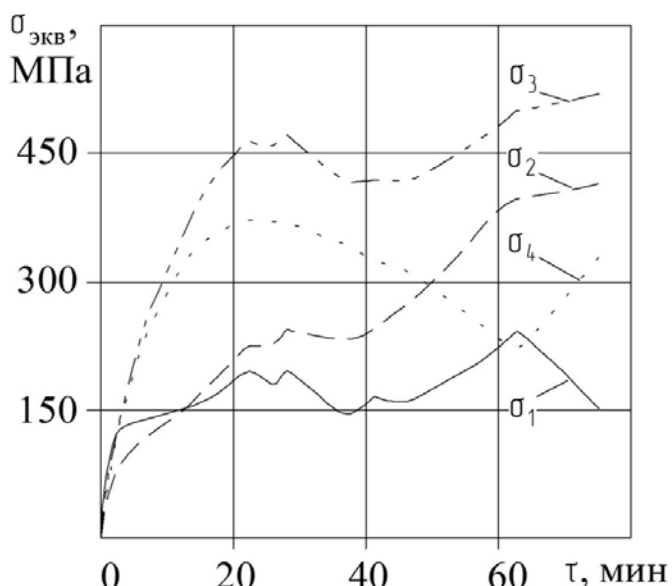


Рис. 5. Расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений в корпусе ЦВД при пуске турбины из холодного состояния по графику ВТИ

Отличительной особенностью пуска турбины из неостывшего состояния является тот факт, что, так как стенка и фланцы корпуса являются достаточно прогретыми, максимальные температурные напряжения возникают не в зоне приварки Г-образного полукольца, а в области паровпуска, в зоне радиусного перехода, и составляют $\sigma_2 = \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 373 \text{ МПа}$ (рис. 6, пятьдесят первая минута пуска).

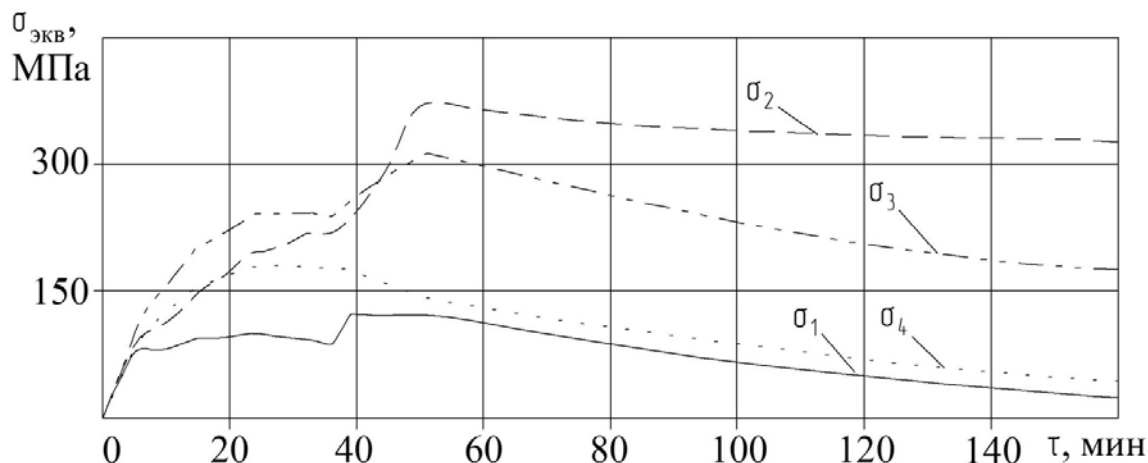


Рис. 6. Расчетные зависимости изменения эквивалентных температурных напряжений в корпусе ЦВД при пуске турбины из неостывшего состояния по графику ВТИ

Полученные результаты показали, что во всех рассмотренных режимах пусков теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 в корпусе ЦВД возникают температурные напряжения, превышающие предел текучести его стали 15Х1М1ФЛ $\sigma_{0,2}^{400^\circ\text{C}} = 220 \text{ МПа}$.

На рис. 7 показаны «критические» зоны корпуса ЦВД, в которых возникают максимальные недопустимые температурные напряжения.

Данными зонами являются:

- область паровпуска в зоне радиусного перехода корпуса (зона «А»);
- зона приварки Г-образного полукольца к корпусу (зона «Б»).

Анализ литературы по вопросам термочечности и надежности элементов конструкции паровых турбин показал, что столь высокие пусковые температурные напряжения могут стать причиной появления и развития трещин, а также снижения ресурса корпуса ЦВД. Поэтому термонапряженное состояние установленных «критических» зон корпуса ЦВД должно определять темп и продолжительность пусковых операций паровой турбины.

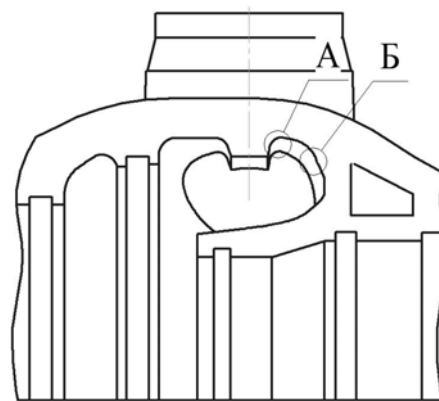


Рис. 7. «Критические» зоны корпуса ЦВД

В **четвертой** главе представлены результаты анализа работы штатной системы контроля за температурным состоянием элементов конструкции теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0, который показал, что для предотвращения возникновения недопустимых температурных напряжений в корпусе ЦВД требуется разработка дополнительных средств контроля.

Одним из способов решения поставленной задачи, по мнению автора, является переход от временного графика прогрева корпуса ЦВД с ограничением времени пуска и принятыми допустимыми разностями температур в контролируемых сечениях к непосредственному определению в реальном масштабе времени температурных напряжений в «критических» зонах корпуса с последующей организацией автоматизированного управления пуском турбины по текущему термонапряженному состоянию этих зон.

С этой целью установлена стохастическая связь между разностями температур в характерных точках корпуса ЦВД и температурными напряжениями в его «критических» зонах. Для этого проведена обработка результатов исследования автора по температурному и термонапряженному состоянию корпуса ЦВД методами регрессионного анализа. Статистической обработке подлежала выборка данных, состоящая из массива значений максимальных расчетных температурных напряжений и соответствующего ему массива характерных температурных разностей, полученных для пусков теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 из различных тепловых состояний по графикам УТЗ и ВТИ.

Таким образом, для зоны «А» удалось получить оптимальный вид регрессионной зависимости между разностями температур по толщине стенки корпуса ($\Delta t_{\text{ст}} = t_1 - t_2$), по оси стенки корпуса ($\Delta t_{\text{ос}} = t_1 - t_3$) и максимальными напряжениями в данной зоне $\sigma_{\text{рег}}^A$:

$$\sigma_{\text{рег}}^A = \beta_0 + \beta_1 \Delta t_{\text{ст}} + \beta_2 \Delta t_{\text{ос}} + \beta_3 \Delta t_{\text{ст}}^2 + \beta_4 \Delta t_{\text{ос}}^2 + \beta_5 \Delta t_{\text{ст}} \Delta t_{\text{ос}},$$

Значения коэффициентов составляют: $\beta_0 = -149,828$; $\beta_1 = 22,595$; $\beta_2 = 3,580$; $\beta_3 = -0,342$; $\beta_4 = -0,010$; $\beta_5 = -0,032$.

Коэффициент детерминации полученного полинома равен $R^2 = 93,8 \%$, то есть изменения зависимого признака $\sigma_{\text{экр}}^A$ объясняются изменениями совокупности независимых признаков $\Delta t_{\text{ст}}$, $\Delta t_{\text{ос}}$ на 93,8 %.

Сравнение температурных напряжений в зоне «А», рассчитанных по регрессионной зависимости, со значениями, полученными в ходе эталонного расчета с помощью программного комплекса ANSYS, показало, что для исходной

базы данных (матрицы плана) максимальная погрешность вычисления температурных напряжений не превышает 20 % (рис. 8). Аналогичные исследования проведены для зоны «Б».

Для построения цифровой системы непрерывного контроля и управления термонапряженным состоянием корпуса ЦВД теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 принята регрессионная зависимость, полученная для зоны «А», так как именно она оказалась «статистически» более надежной. Для этого необходимо установить три штатных датчика измерения температуры металла (рис. 9), а также разработать дополнительные алгоритмы в составе электрической части системы регулирования и защиты (ЭЧСРиЗ) паровой турбины.

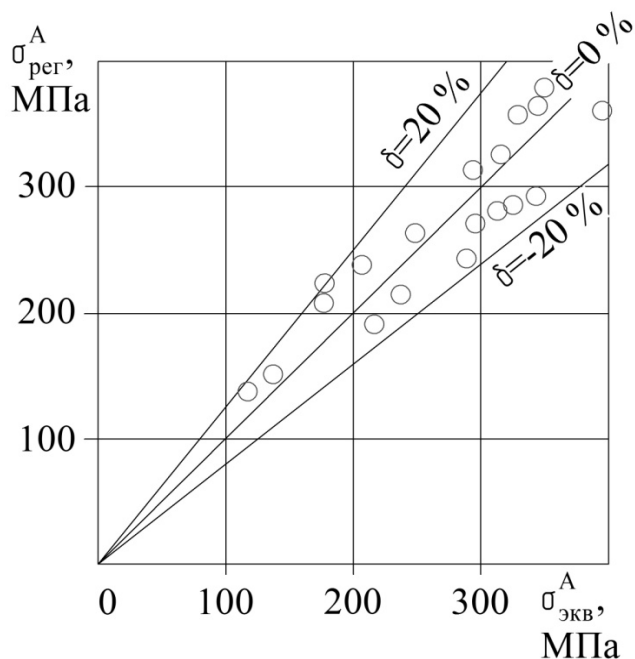


Рис. 8. Поля корреляции температурных напряжений в зоне «А»

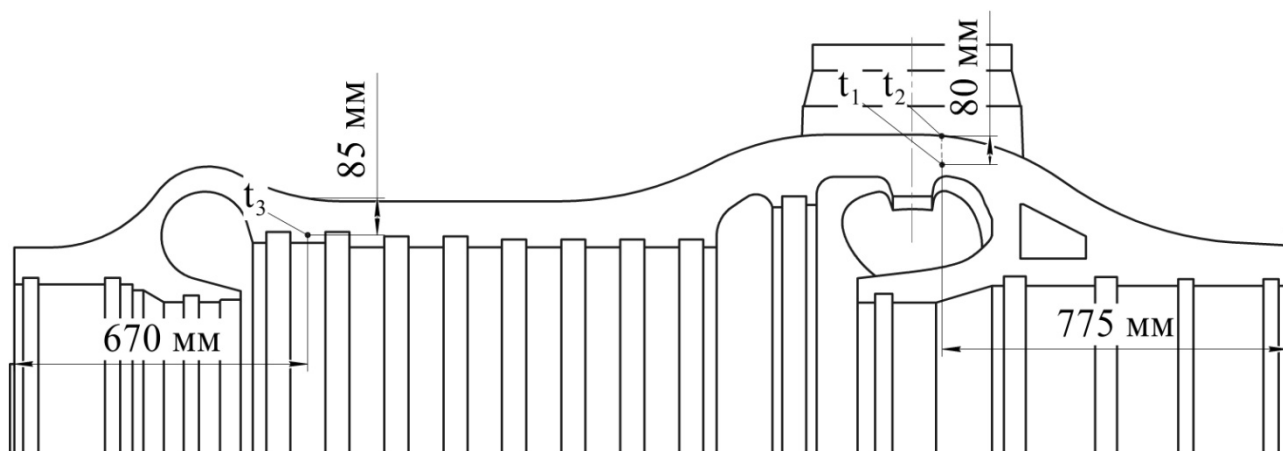


Рис. 9. Характерные точки измерения температур металла в стенке корпуса ЦВД

В **пятой** главе представлены разработки автора, позволяющие осуществлять непрерывный контроль и автоматическое ограничение недопустимых температурных напряжений в «критических» элементах конструкции теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0.

На основе полученной регрессионной зависимости в составе ЭЧСРиЗ разработан модуль вычисления температурных напряжений в зоне «А», позволяющий получать непрерывную информацию о текущем термонапряженном состоянии корпуса ЦВД паровой турбины. На рис. 10 схематично представлен алгоритм работы данного модуля.

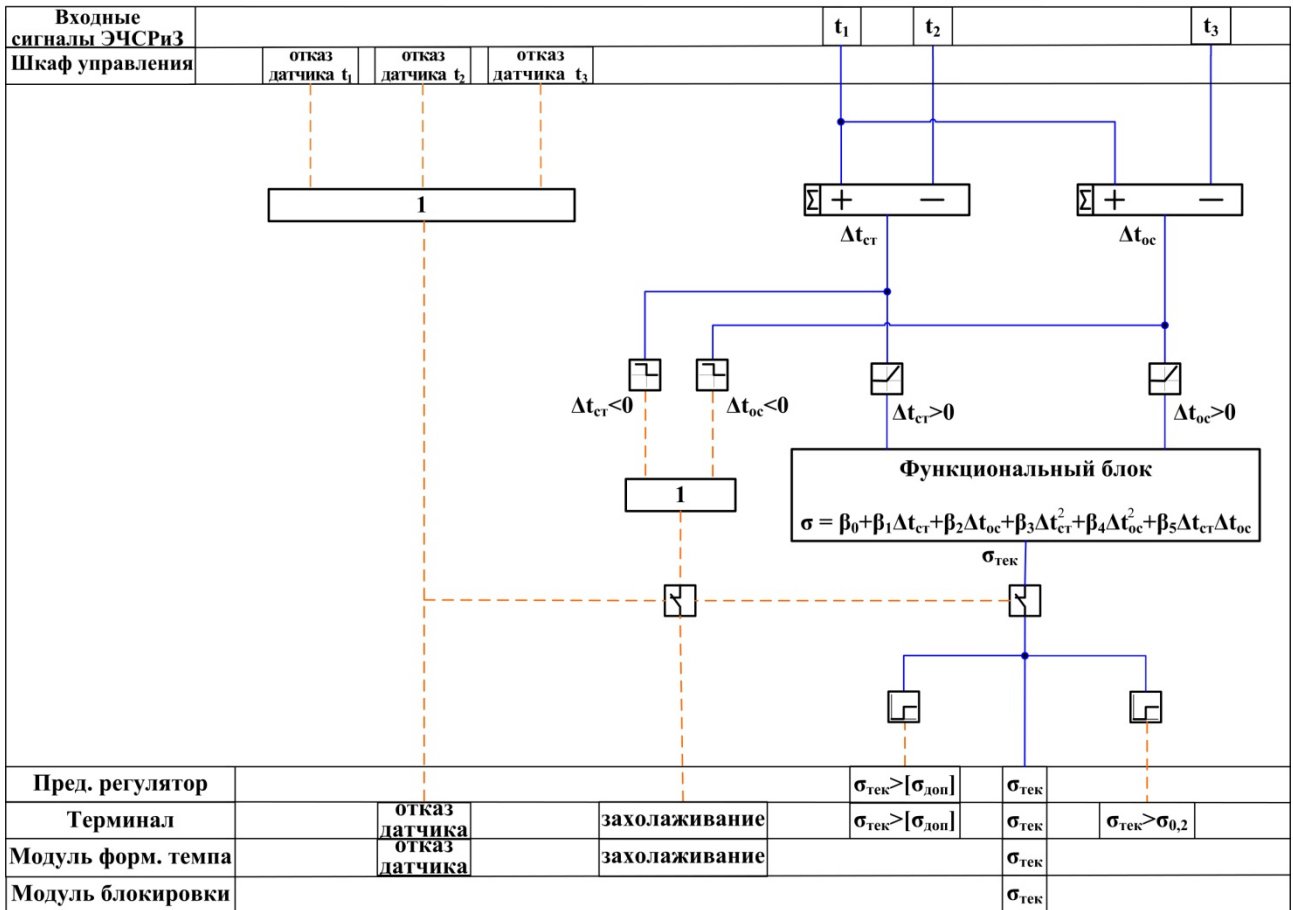


Рис. 10. Модуль вычисления температурных напряжений в зоне «А» корпуса ЦВД

Входными сигналами для представленного модуля являются сигналы датчиков измерения температуры металла в точках корпуса ЦВД (t₁, t₂, t₃).

На выходе из модуля «вычисления температурных напряжений» формируется сигнал, соответствующий текущим температурным напряжениям в зоне «А», а на терминале оператора появляется непрерывная информация о текущем термонапряженном состоянии корпуса ЦВД. Если температурные напряжения превышают установленный предел допустимых напряжений, а затем и предел текучести стали корпуса, на терминал оператора поступают соответствующие предупреждения.

Под предельно допустимыми напряжениями автор понимает значение предела текучести стали корпуса с учетом некоторого коэффициента запаса. При коэффициенте запаса n=1,5 предельно допустимое значение температурных напряжений в контролируемой зоне корпуса ЦВД составит

$$[\sigma_{\text{доп}}] = \frac{\sigma_{0,2}}{n} = \frac{220}{1,5} = 146,6 \approx 150 \text{ МПа.}$$

В случае, если хотя бы одна из полученных разностей температур имеет отрицательное значение, вычисление температурных напряжений приостанавливается, а на рабочей станции оператора появляется предупреждение о том,

что металл турбины захлаживается. Также вычисление температурных напряжений приостанавливается в случае отказа одного из датчиков измерения температуры металла, а на рабочей станции оператора появляется предупреждение о неисправности.

Полученные таким образом значения температурных напряжений используются для организации автоматического ограничения недопустимых температурных напряжений в зоне «А» корпуса ЦВД.

На рис. 11 представлен алгоритм работы модуля, формирующего коррекцию задания темпа повышения частоты вращения валопровода паровой турбины в зависимости от термонапряженного состояния корпуса ЦВД. Аналогично организован алгоритм работы данного модуля и после синхронизации генератора с сетью (на рис. 11 не показан).

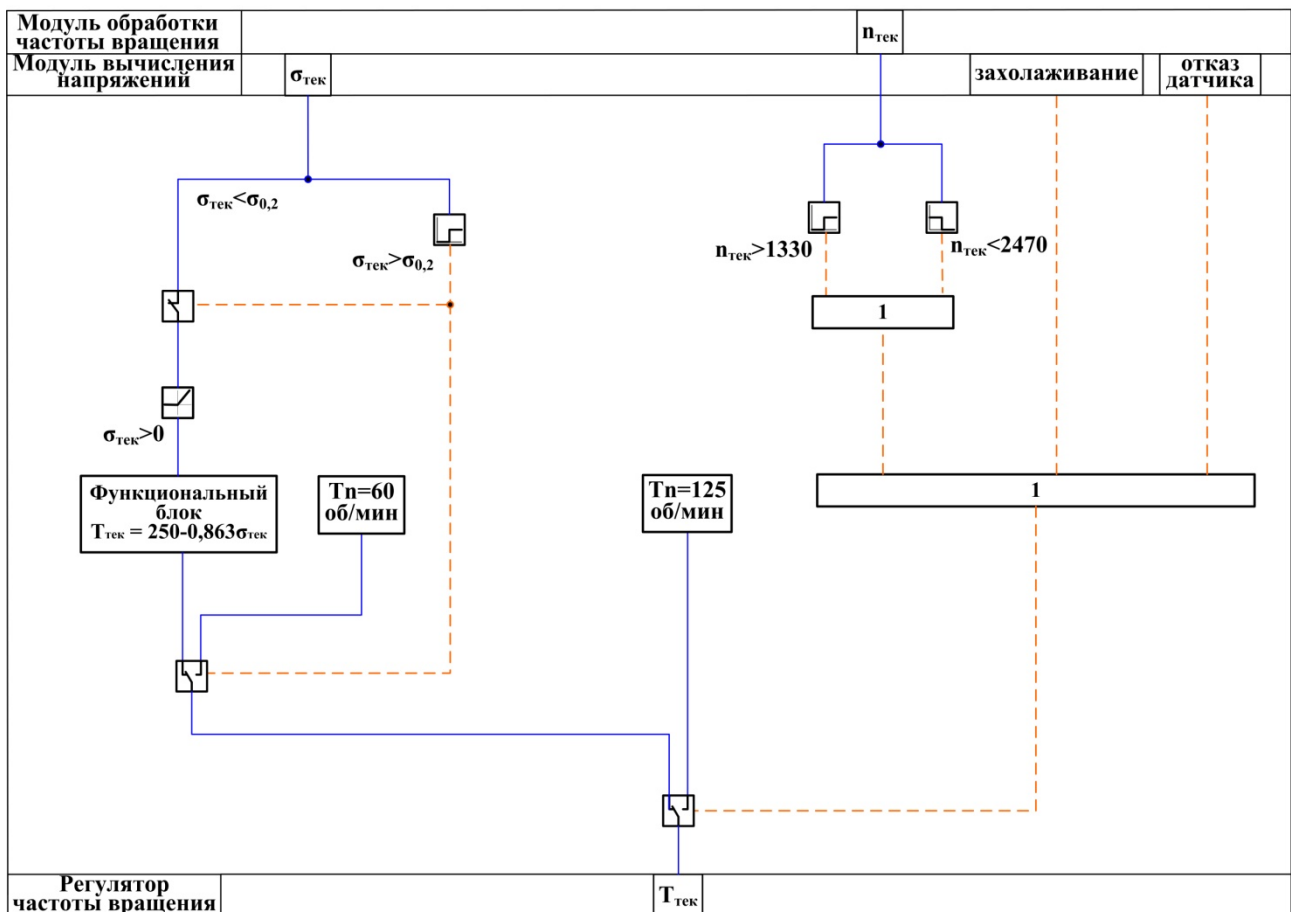


Рис. 11. Модуль формирования темпа нагружения паровой турбины

При создании модуля принято:

- диапазон изменения темпа задания частоты вращения составляет 60-250 об/мин за минуту;
- темп изменения частоты вращения в диапазоне температурных напряжений 0-220 МПа определяется по формуле $T_n = 250 - 0,863\sigma_{тек}$;

- при захолаживании корпуса ЦВД или отказе датчиков измерения температуры металла программа автоматически возвращает штатный темп набора частоты вращения 125 об/мин за минуту;

- при возникновении в корпусе ЦВД температурных напряжений, превышающих предел текучести стали, программа автоматически устанавливает минимальный темп набора частоты вращения 60 об/мин за минуту.

Принятые диапазоны значений, а также функциональная зависимость между темпом и температурными напряжениями должны быть скорректированы в процессе пуско-наладочных работ с учетом опытных данных.

Особенностью работы данного модуля на режиме набора частоты вращения является тот факт, что при повышении частоты вращения валопровода следует учитывать расчетные критические частоты вращения роторов турбины и генератора. Критические частоты необходимо проходить быстро, возможное замедление темпа набора частоты вращения в момент прохождения критических частот недопустимо, так как может привести к росту вибрации. Поэтому в модуле предусмотрена блокировка изменения темпа набора частоты вращения, если последняя находится в диапазоне 1330-2470 об/мин. В указанном диапазоне темп набора частоты вращения постоянен и соответствует штатному 125 об/мин за минуту.

Другим способом предотвращения недопустимых температурных напряжений в элементах конструкции паровой турбины может стать модуль, формирующий сигнал блокировки на увеличение частоты вращения или мощности паровой турбины при превышении температурными напряжениями в зоне «А» допустимого предела. Данный способ наиболее прост в реализации и заключается в автоматической организации технологических выдержек при пуске паровой турбины, необходимых для ее прогрева.

На время прохождения паровой турбиной критических частот вращения модуль «блокировки регуляторов» автоматически отключается.

Поскольку основным режимом разворота и нагружения паровой турбины в составе ПГУ является режим скользящего давления, работа предлагаемых модулей возможна только до момента полного открытия регулирующих клапанов контура ВД (РК ВД), что примерно соответствует мощности паровой турбины $N_{пт} \approx 20$ МВт. Последующее нагружение паровой турбины осуществляется за счет увеличения мощности ГТУ, и для организации дальнейшего задания оптимального темпа нагружения паровой турбины необходимо согласование алгоритмов управления ПТУ с алгоритмами управления ГТУ и КУ. Поэтому на эта-

пе нагружения паровой турбины способом скользящего давления может быть более целесообразна организация защиты от возникновения недопустимых температурных напряжений при помощи предохранительного регулятора, также реализуемого в ЭЧСРиЗ (рис. 12).

Принцип действия предлагаемого регулятора заключается в том, чтобы, используя обратную связь, полученную из модуля вычисления температурных напряжений, осуществлять разгрузку паровой турбины, то есть прикрывать РКВД пропорционально росту температурных напряжений в зоне «А» корпуса ЦВД.

Необходимо отметить, что уровень температурных напряжений в «критических» зонах корпуса ЦВД на начальных этапах пуска достаточно высок, поэтому разгрузке паровой турбины по средствам работы предохранительного регулятора может приводить к полному закрытию РКВД и

замедлению пусковых операций. Кроме этого, значительное прикрытие РКВД приведет к дросселированию потока пара и существенному снижению его температуры, что может стать причиной захлаживания металла проточной части турбины. С учетом данного обстоятельства работа предохранительного регулятора недопустимых температурных напряжений предполагается только на режимах набора электрической нагрузки, когда РКВД достаточно открыты.

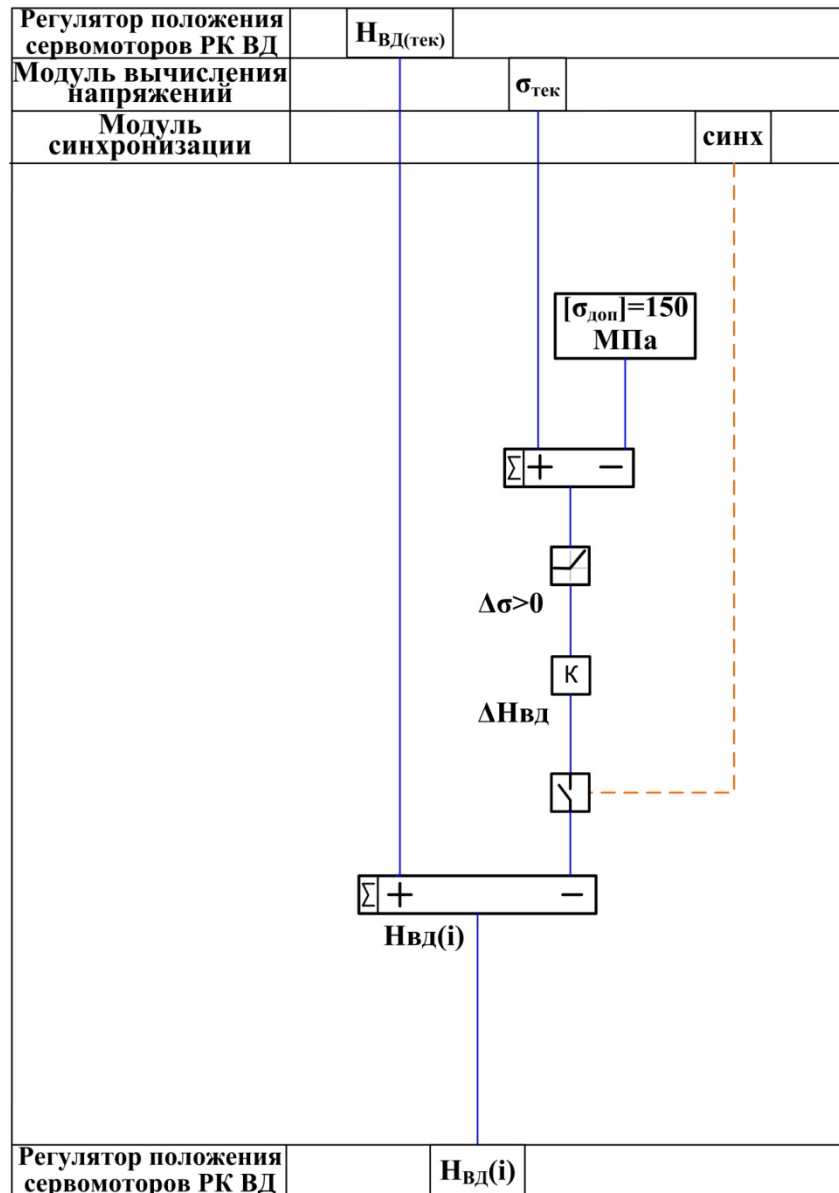


Рис. 12. Предохранительный регулятор недопустимых температурных напряжений в зоне «А» корпуса ЦВД

С учетом разработанных средств автором произведено уточнение технологии пуска теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0.

Согласно существующей технологии пуска данной паровой турбины, все основные пусковые операции определяются временными графиками, на основе которых, в зависимости от теплового состояния оборудования, оперативно-техническим персоналом станции нагружается паровая турбина, а также организуются выдержки для ее прогрева. Однако соблюдение требований, предписанных данными графиками, в общем случае не имеет строгого характера и во многом зависит от добросовестности и квалифицированности персонала. С другой стороны, завод-изготовитель несет гарантийные обязательства перед заказчиком (станцией) и заинтересован в надежности работы поставляемого оборудования, а значит, и в его правильной эксплуатации.

С учетом реализации перечисленных решений пуск теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 может осуществляться следующим образом:

- 1) Выход на холостой ход. Для этого на терминале оператора в ячейку задания регулятора частоты вращения вводится значение «3000» об/мин;
- 2) Синхронизация генератора с электросетью. Для этого управление паровой турбиной передается в электроцех;
- 3) Полное открытие РК ВД. Для этого на терминале оператора в ячейку задания регулятора положения сервомоторов ВД вводится значение, соответствующее полному открытию РК ВД, в данном случае «70» мм.

При этом темп нагружения и выдержки, необходимые для прогрева турбины, будут устанавливаться автоматически модулями «формирования темпа» и «блокировки регуляторов».

4) Последующее нагружение паровой турбины осуществляется за счет увеличения мощности ГТУ при полностью открытых клапанах РК ВД, поэтому единственным способом ограничить температурные напряжения в «критической» зоне корпуса ЦВД (с позиции завода-изготовителя) является включение в работу предохранительного регулятора и передача информации на ограничение мощности в систему управления ГТУ и КУ.

Разработанная автором технология пуска паровой турбины позволит обеспечить оптимальный режим эксплуатации оборудования по условию термомпрочности. Данную технологию планируется опробовать на теплофикационной паровой турбине КТ-63-7,7 в составе ПГУ-230 Академической ТЭЦ города Екатеринбурга.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В рамках диссертационной работы разработаны следующие модели прогрева и НДС высокотемпературных элементов конструкции теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0:

- двухмерная осесимметричная конечно-элементная модель прогрева и НДС РВД, учитывающая охлаждение пара в переднем концевом уплотнении и реальную геометрическую конфигурацию в зоне лабиринтовых уплотнений;
- трехмерная конечно-элементная модель прогрева и НДС верхней половины корпуса ЦВД.

2. Разработанные модели позволили получить полные температурные поля, а также температурные напряжения в РВД и корпусе ЦВД для пусков теплофикационной паровой турбины Т-53/67-8,0 из холодного и неостывшего состояния по графикам УТЗ и ВТИ.

На основании полученных результатов установлено:

- в РВД не возникает температурных напряжений, превышающих предел текучести его стали;
- термонапряженное состояние РВД не является фактором, ограничивающим маневренные характеристики паровой турбины;
- в корпусе ЦВД возникают температурные напряжения, превышающие предел текучести стали;
- «критическими» зонами корпуса ЦВД, ограничивающими маневренные характеристики паровой турбины, являются область паровпуска в зоне радиусного перехода (зона «А») и зона приварки Г-образных полуколец к корпусу турбины (зона «Б»);
- возникновение в корпусе ЦВД температурных напряжений, превышающих предел текучести стали, может стать причиной появления и развития трещин, а также снижения его ресурса.

3. Методами регрессионного анализа проведена статистическая обработка результатов исследования температурного и термонапряженного состояния корпуса ЦВД.

На основе полученных результатов установлен оптимальный вид регрессионной зависимости между температурными напряжениями в «критической» зоне «А» и разностями температур по толщине и по оси стенки корпуса ЦВД.

Показано, что для построения системы контроля за термонапряженным состоянием корпуса ЦВД целесообразно использовать зону «А».

Установлено, что максимальные погрешности вычисления температурных напряжений по принятой регрессионной зависимости для зоны «А» не превышают 20 %.

Показано, что для организации контроля за температурными напряжениями в зоне «А» необходима установка трех термопар, а также разработка и включение дополнительных алгоритмов в состав ЭЧСРиЗ паровой турбины.

4. В составе ЭЧСРиЗ разработаны алгоритмы, позволяющие непрерывно контролировать и автоматически ограничивать недопустимое термонапряженное состояние корпуса ЦВД:

- модуль, позволяющий получать непрерывные сведения о термонапряженном состоянии корпуса ЦВД путем расчета температурных напряжений в его «критических» зонах по полученным регрессионным зависимостям;
- модуль, формирующий коррекцию задания темпа нагружения паровой турбины в зависимости от термонапряженного состояния корпуса ЦВД;
- модуль, формирующий блокировки на увеличение частоты вращения или мощности паровой турбины при превышении температурными напряжениями в «критических» зонах корпуса ЦВД допустимого предела;
- предохранительный регулятор, автоматически разгружающий паровую турбину при превышении температурными напряжениями в «критических» зонах корпуса ЦВД допустимого предела.

5. Разработана технология пуска теплофикационной паровой турбины для ПГУ, позволяющая перейти от временных графиков пуска паровой турбины к автоматизированному пуску турбины по текущему термонапряженному состоянию «критических» элементов ее конструкции, что, в свою очередь, обеспечит оптимальный режим эксплуатации оборудования по условию термпрочности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кляйнрок И.Ю. Исследование термонапряженного состояния ротора высокого давления паровой турбины для ПГУ / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // Тяжелое машиностроение. – 2011. – №6. – С. 12-16.

2. Кляйнрок И.Ю. Исследование термонапряженного состояния корпуса ЦВД паровой турбины Т-53/67-8,0 ЗАО «УТЗ» для ПГУ-230 / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // Надежность и безопасность энергетики. – 2011. – № 14. – С. 65-69.

3. Кляйнрок И.Ю. Определение «критических» элементов конструкции паровой турбины, ограничивающих маневренность парогазового энергоблока / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 15-17.

4. Кляйнрок И.Ю. Получение приближенных зависимостей для контроля за термонапряженным состоянием корпуса паровой турбины / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 2. – С. 53-56.

5. Кляйнрок И.Ю. Разработка современных средств оперативного контроля за термонапряженным состоянием корпуса паровой турбины / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 16. – С. 58-61.

Прочие публикации:

6. Кляйнрок И.Ю. Апробация методического пособия «Расчет тепловой схемы утилизационной двухконтурной парогазовой установки с конденсационной паровой турбиной» / И.Ю. Кляйнрок, В.Л. Похорилер, В.Н. Голошумова // XVI Уральская международная конференция молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – Ч. 4. – С. 220-221.

7. Кляйнрок И.Ю. Уточнение граничных условий теплообмена в зоне концевых уплотнений ротора паровой турбины / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: материалы VI Международного симпозиума. – М.: РАН, 2011. – Т.2. – С. 21-23.

8. Кляйнрок И.Ю. Автоматизация непрерывного управления пусковыми режимами паровых турбин / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // Турбины и дизели. – 2011. – № 6. – С. 44-48.

9. Кляйнрок И.Ю. Выбор геометрической модели при исследовании теплового состояния корпусов паровых турбин / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова,

Ю.М. Бродов // V Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования»: материалы. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 2011. – С. 94-97.

10. **Кляйнрок И.Ю.** Организация контроля за тепловым состоянием элементов конструкции паровой турбины для ПГУ / И.Ю. Кляйнрок, В.Н. Голошумова, Ю.М. Бродов // II Международная научно-практическая конференция «Современная наука: теория и практика». Т.1. Естественные и технические науки: сборник материалов. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2011. – С. 174-177.

11. Шехтер М.В. Современная электрогидравлическая система регулирования и защиты паровых турбин ЗАО «Уральский турбинный завод» / М.В. Шехтер, **И.Ю. Кляйнрок** // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – 2012. – № 8. – С. 105-112.

12. **Кляйнрок И.Ю.** Разработка модуля «блокировки регуляторов» по температурным напряжениям в элементах конструкции паровой турбины / И.Ю. Кляйнрок, Н.Н. Байдина, В.Б. Николаев // II Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Современная российская наука глазами молодых исследователей»: сборник статей. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2012. – Т.2 – С. 239-241.

13. **Кляйнрок И.Ю.** Разработка средств автоматического ограничения недопустимых температурных напряжений в корпусе паровой турбины // Всероссийская молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего»: сборник материалов. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 241-243.

14. **Кляйнрок И.Ю.** Исследование термонапряженного состояния корпуса паровой турбины на номинальном режиме работы // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: X международная научно-практическая интернет конференция: сборник материалов – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2012. – С. 161-164.

Подписано в печать _____ 2012

Формат 60x84 1/16

Бумага типографская

Плоская печать.

Усл. печ. л. 1,4

Уч.-изд. л. 1,1

Тираж 100 экз.

Заказ ____

Ризография НИЧ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19